

# KAJIAN EKSPERIMENTAL KONVERSI ENERGI GELOMBANG DENGAN MENGGUNAKAN KOMBINASI *WELLS ROTOR* DAN TURBIN *DARRIEUS*

## *Experimental Study of Wave Energy Conversion Using a Combination of Wells Rotor and Darrieus Turbine*

Daif Rahuna<sup>1</sup>, Sutopo Purwono Fitri<sup>2</sup>, Erwandi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

<sup>2</sup> Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

<sup>3</sup>Pusat Teknologi Rekayasa Industri Maritim-BPP Teknologi, Surabaya.

Email: rahuna.daif@gmail.com

Diterima: 02 Juni 2016; Direvisi: 07 Juni 2016; Disetujui: 27 Juni 2016

### Abstrak

Potensi energi yang terjadi pada kawasan pesisir pantai sangat besar, bagaimana memanfaatkan energi yang bersumber dari arus (*longshore current*, *rip current*, *back flows/cross-shore flows*) dan gelombang pantai tersebut sebagai sumber energi baru terbarukan. Kajian eksperimental ini dilakukan adalah untuk membuktikan bahwa dua tipe turbin yang berbeda untuk dapat mengkonversi energi arus dan gelombang bersamaan. Hasil dari kajian eksperimental adalah *Wells rotor* yang terpasang horisontal hanya mampu menerima energi gelombang akibat adanya gerakan *orbital* dari partikel-partikel air dan tidak efektif dalam menerima energi arus air karena sejajar dengan arah aliran partikel air. Bilah turbin *darrieus* akan menjadi *resistance* disaat terkena gelombang. Turbin kombinasi mempunyai *self starting* yang rendah dimana pada kecepatan arus 0,2 m/s dan tinggi gelombang 0,08 m. efisiensi maksimal yang diperoleh dari turbin kombinasi *wells* dan *darrieus* adalah sebesar 21,6 persen dan pada *wells rotor* sebesar 20,8 persen dengan ketinggian gelombang 0,123 m. *Tip speed ratio* (TSR) pada turbin kombinasi sebesar 1,84 dan pada *wells rotor* sebesar 2,26.

**Kata kunci:** *wells rotor*, energi gelombang, turbin *darrieus*, efisiensi

### Abstract

Potential energy that occurs in nearshore areas are very large, how to harness the energy derived from the current (*longshore current*, *rip currents*, *flows back / cross-shore flows*) and the beach waves as a source of renewable energy. This experimental study was performed to prove that the two different types of turbines that can convert energy to flow and wave simultaneously. The results of experimental studies *wells rotor* is mounted horizontally only able to receive as a result of the wave energy from the orbital motion of the water particles and ineffective in receiving water because the energy flows parallel to the direction of flow of water particles. *Darrieus* turbine blades will become resistant when wave exposed. Turbine combination has a low self starting where the flow velocity of 0.2 m / s and a wave height of 0.08 m. Maximum efficiency is obtained from *wells* and *Darrieus* turbine combination was 21.6 percents and 20.8 percents rotor *wells* with a wave height of 0.123 m. *Tip speed ratio* (TSR) of the turbine combination 1.84 and the *wells rotor* 2.26.

**Keywords:** *wells rotor*, wave energy, *darrieus* turbine, efficiency

## PENDAHULUAN

Menurut John Twidell dan Tony Weir (2007), energi yang dihasilkan dari energi gelombang sangat besar, dimana energi gelombang laut yang dihasilkan berbanding dengan amplitudo dan periode pergerakan gelombang laut, dimana panjang periode (~10s) dan besar amplitudo (~2m). Energi yang dihasilkan umumnya 50 sampai dengan 70 kW m<sup>-1</sup> dari lebar gelombang.

Sedangkan arus laut mempunyai potensi energi yang tersimpan juga cukup besar, menurut Kantha dan Clayson (2000), interaksi yang terjadi antara bumi dan bulan diperkirakan menghasilkan energi arus dan pasang surut sebesar 3,17 TW (*teta watt*) setiap harinya diseluruh dunia sedikit lebih besar dari seluruh pembangkit yang ada diseluruh dunia di tahun 1995 yaitu sebesar 2,92 TW.

Menurut Bernard Le Mehaute (1976), gelombang laut dapat menghasilkan eneri potensial dan energi kinetik. Energi potensial gelombang laut dipengaruhi adanya tinggi gelombang sedangkan energi kinetik tergantung adanya pergerakan jumlah partikel air laut. Sehingga total energi gelombang laut yang dihasilkan:

$$E_T = E_p + E_k \quad (1)$$

dimana:  $E_p$  = energi potensial [J/m]  
 $E_k$  = energi kinetik [J/m]

Gelombang yang datang menuju pantai membawa massa air dan momentum, searah penjalaran gelombangnya. Hal ini menyebabkan terjadinya arus di sekitar kawasan pantai. Penjalaran gelombang menuju pantai akan melintasi daerah-daerah lepas pantai (*offshore zone*), daerah gelombang pecah (*surf zone*), dan daerah deburan ombak di pantai (*swash zone*). Diantara ketiga daerah tersebut, Bambang Triatmodjo (1999), menjelaskan bahwa karakteristik gelombang di daerah *surf zone* dan *swash zone* adalah yang paling penting di dalam analisis proses pantai. Gerakan dari partikel-partikel air tersebut menyimpan energi potensial yang sangat besar, sehingga memungkinkan untuk dimanfaatkan menjadi suatu sumber energi baru. Dimana gelombang menyimpan suatu energi potensial dan energi kinetik sedangkan arus menyimpan energi kinetik.

Pada kawasan pesisir pantai (*nearshore*) fenomena yang terjadi menurut Dean dan Dalrymple (2002), perputaran/sirkulasi arus di sekitar pantai dapat

digolongkan dalam tiga jenis, yaitu: arus sepanjang pantai (*longshore current*), arus seret (*rip current*), dan aliran balik (*back flows/cross-shore flows*). Sistem sirkulasi arus tersebut seringkali tidak seragam antara ketiganya bergantung kepada arah/sudut gelombang datang. Karena gelombang yang terjadi itupun sangat dipengaruhi oleh angin.

Dengan adanya potensi energi yang terjadi pada kawasan pesisir pantai sangat besar, bagaimana memanfaatkan energi yang bersumber dari arus (*longshore current*, *rip current*, *back flows/cross-shore flows*) dan gelombang pantai tersebut sebagai sumber energi baru terbarukan untuk kepentingan manusia? Alat konversi energi saat ini dalam menyerap energi laut berupa turbin.

Dalam penyerapan energi arus laut sering menggunakan jenis turbin tipe *darrieus*, dimana turbin tersebut mempunyai sumbu vertikal, dengan komponen utama, antara lain bilah (*blade*), lengan (*radial arm*) dan poros (*shaft*). Pada turbin tipe *darrieus* mempunyai bilah yang sejajar dengan sumbu poros turbin, dimana pada bilah terdapat lengan turbin sekaligus sebagai penumpu bilah untuk menyerap energi dari arah horisontal.

Umumnya *wells rotor* digunakan pada konversi penyerapan energi gelombang sistem *oscilating water coulomb* (OWC), dimana turbin berada di dalam ruangan. Gerakan turbin tergantung dari gerakan fluida udara/air di dalamnya, ada yang langsung memanfaatkan gerakan air naik-turun akibat gelombang dan ada juga yang memanfaatkan udara yang terkompresi akibat gerakan gelombang. *Wells rotor* mempunyai dua bagian utama, antara lain poros turbin (*shaft*) dan bilah (*blade*). *Wells rotor* tidak memiliki lengan karena posisi bilah tegak lurus dengan poros dan dihubungkan dengan hub dan poros pada pusatnya. Dengan demikian tipe *wells rotor* mampu untuk mengkonversi energi gelombang menjadi energi mekanik dimana gerakan orbital dari partikel air akan diubah menjadi gerakan berputar dari *wells rotor*.

Karena kedua tipe turbin tersebut bekerja pada sumber energi yang berbeda, maka dilakukan penggabungan kombinasi kedua tipe tersebut dengan harapan turbin kombinasi ini mampu untuk menyerap energi arus dan gelombang secara bersamaan. Untuk itu perlu dibuat model turbin ini untuk mengetahui performa dari turbin kombinasi dalam skala laboratorium.

## Kajian Eksperimental Konversi Energi Gelombang dg Menggunakan Kombinasi *Wells Rotor* dan Turbin *Darrieus* (Daif Rahuna, Sutopo Purwono Fitri, Erwandi)

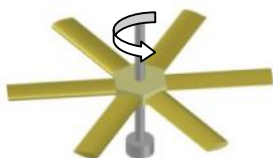
Tujuan dari kajian eksperimental pada turbin kombinasi *wells* dan *darrieus* ini adalah untuk mengetahui performa dari turbin, karakteristik, efisiensi, daya yang dihasilkan dan perbandingan antara kecepatan partikel air dan putaran yang dihasilkan.

Manfaat dan dampak yang diharapkan dari kajian eksperimental pada turbin kombinasi *wells* dan *darrieus* ini adalah:

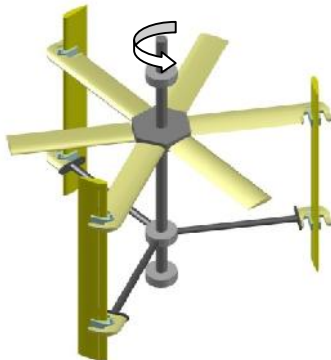
1. Pemanfaatan arus dan gelombang laut pada daerah pesisir menjadi sumber energi baru.
2. Adanya rancangan turbin kombinasi *wells* dan *darrieus* sebagai alat konversi energi gelombang.
3. Adanya data-data yang mendasar dalam proses desain rancang bangun dari turbin kombinasi.

### METODOLOGI PENELITIAN

Model fisik dari turbin kombinasi *wells* dan *darrieus* mempunyai spesifikasi sebagai berikut, untuk *wells rotor* seperti pada gambar 1, tipe *foil airofoil* NACA 0021, Jumlah bilah *wells rotor* 6 buah, diameter *wells rotor* 0,910 m, panjang *chord* 0,180 m *solidity* 0,62 dengan sudut *pitch* 0°; untuk turbin *darrieus* seperti pada gambar 2. menggunakan tipe *foil* NACA 0021, diameter 1,04 m, panjang *chord* 0,083 m, panjang 0,980 m, jumlah bilah 3 dengan *solidity* 0,41.



Gambar 1. *Wells rotor*



Gambar 2. *Wells rotor* dan turbin *darrieus*

Model fisik dari turbin kombinasi terbuat dari bahan *fibreglass* sebagai kulit dengan *frame* penguat

dari bahan aluminium dan rongga dalamnya diisi dengan *foam*. Untuk poros dan *frame* penumpu poros menggunakan bahan baja, seperti pada gambar 3. Poros *wells rotor* dan turbin *darrieus* menjadi satu titik pusat. *Wells rotor* juga difungsikan sebagai *radial arm* dari bilah-bilah turbin *darrieus*.



Gambar 3. Model uji turbin kombinasi

Pengujian dilakukan di kolam uji (*shallow water*) dengan gelombang buatan, adapun data gelombang sebagai berikut: gelombang regular dengan tinggi gelombang 0,08 – 0,18 m, periode 1,0; 1,5; 2,0 s, sedangkan kedalaman kolam uji 1,2 m.

Alat ukur yang digunakan dalam pengambilan data hasil pengujian antara lain, *tachometer*, *torquemeter* dan *wave probe*. Sebelum digunakan dalam pengujian masing-masing alat tersebut di kalibrasi terlebih dulu.

Dalam pengujian ini terdapat 3 konfigurasi dimana konfigurasi 1 adalah pengujian *wells rotor*, konfigurasi 2 adalah pengujian turbin *darrieus* dan konfigurasi 3 adalah turbin kombinasi *wells* dan *darrieus*. Di kolam uji *frame* turbin diletakan secara tetap pada dasar kolam (tidak terapung) dan dibiarkan terkena hantaman gelombang buatan. Tinggi gelombang divariasikan, yang mana terlebih dulu harus ditentukan periode optimum dalam menghasilkan putaran yang maksimal.

Data hasil pengujian didapat data gelombang sesuai dengan hasil pengukuran *wave probe*, putaran turbin dan torsi yang dihasilkan. Dari data-data tersebut akan diolah untuk mengetahui kecepatan partikel air, daya dan efisiensi maksimal yang

dihasilkan oleh turbin kombinasi antara *wells rotor* dan turbin *darrieus*.

## DASAR TEORI

Adanya gerakan fluida yang menumbuk bidang *foil* sehingga terjadi gaya *lift* dan gaya *drag*, dan resultan kedua gaya tersebut adalah *thrust*, seperti ditunjukkan gambar 4.

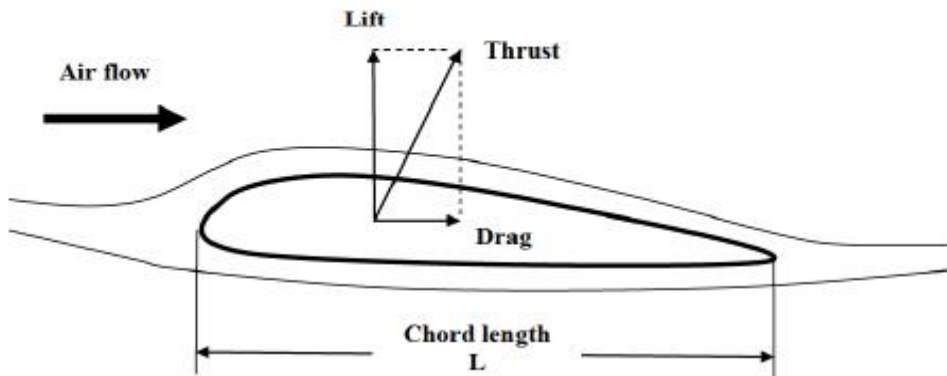
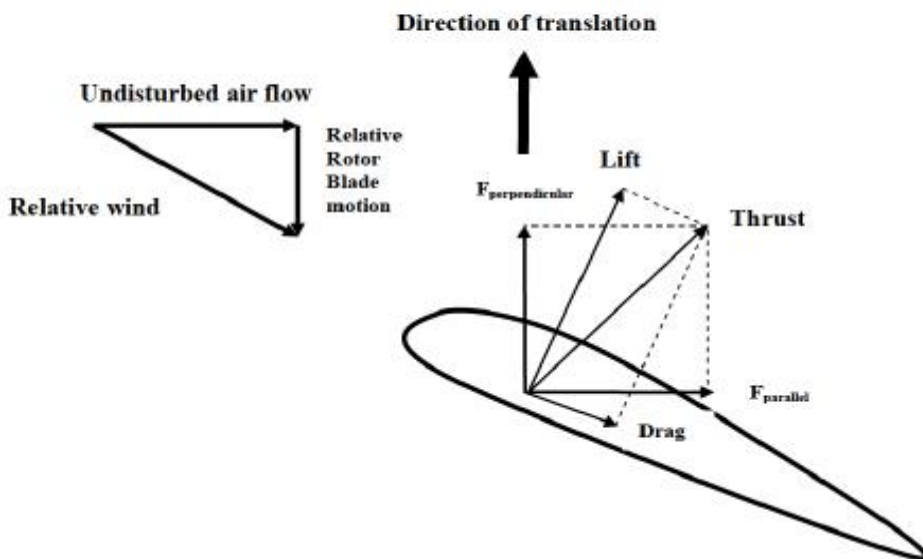


Figure 2. Forces on a stationary rotor blade in an air flow.



Gambar 4. Gaya yang bekerja pada bilah yang berbentuk *airfoil* (M. Ragheb, 2013)

Untuk menentukan besarnya potensi energi yang dihasilkan dari gelombang laut tersebut dapat menggunakan persamaan dibawah ini.

$$P = 0,5 \eta \rho A v^3 \quad (2)$$

dimana:

$P$  = daya listrik (watt)

$\eta$  = efisiensi turbin

$\rho$  = density air laut ( $\text{kg/m}^3$ )

$A$  = luas penampang ( $\text{m}^2$ )

# Kajian Eksperimental Konversi Energi Gelombang dg Menggunakan Kombinasi *Wells Rotor* dan Turbin *Darrieus* (Daif Rahuna, Sutopo Purwono Fitri, Erwandi)

$V$  = kecepatan arus (m/s)

Yang mana nilai gaya dorong jika dikalikan dengan *radius* dari turbin akan menghasilkan nilai torsi turbin yang dinyatakan dengan:

$$T = F \cdot R \quad (2)$$

dimana:

$T$  = Torsi (Nm)

$F$  = gaya dorong (N)

$R$  = jari-jari turbin (m)

Sehingga besar daya yang dimiliki oleh turbin Darrieus dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P_T = \omega \cdot T \quad (3)$$

dimana:

$P_T$  = daya turbin (watt)

$T$  = torsi (Nm)

$\omega$  = kecepatan sudut (rad/s)

Efisiensi turbin merupakan perbandingan antara daya turbin yang dihasilkan dengan daya yang dimiliki oleh aliran air. Hubungan ini dinyatakan dalam persamaan:

$$\eta_T = \frac{P_T}{P_N} \quad (4)$$

dimana:

$\eta_T$  = efisiensi turbin

$P_N$  = daya turbin (watt)

$P_T$  = daya mesin (watt)

Menurut Scheijgrond et.al. (2010), kecepatan *orbital* partikel air maksimum terdapat pada permukaan atau pada kedalaman  $dy=0$ , untuk menentukan kecepatan partikel air menggunakan persamaan dibawah ini.

$$v = \frac{\pi H}{T_p} \quad (5)$$

dimana:

$V$  = kecepatan *orbital* partikel air (m/s)

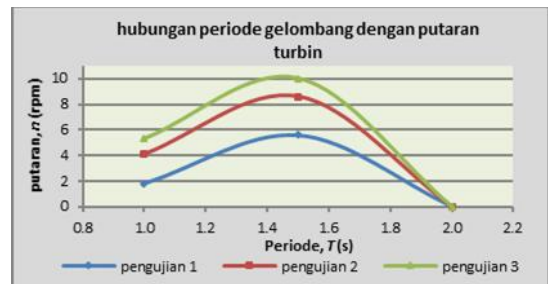
$H$  = tinggi gelombang (m)

$T_p$  = periode (s)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

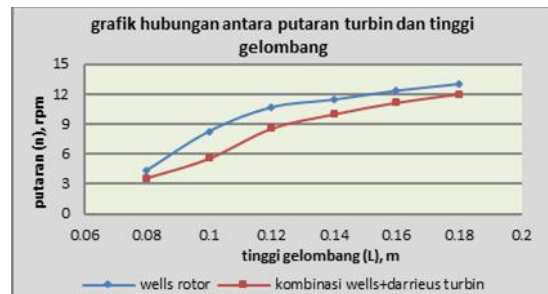
Dengan memvariasikan beberapa tinggi gelombang dan periode maka didapatkan beberapa data hasil putaran dari turbin. Sehingga pemilihan periode ( $T$ ) yang optimum dalam konversi energi gelombang yang

digunakan sebagai inputan energi pada turbin kombinasi *wells* dan *darrieus* sebesar **1,5 detik**.



Gambar 5. Grafik periode optimum

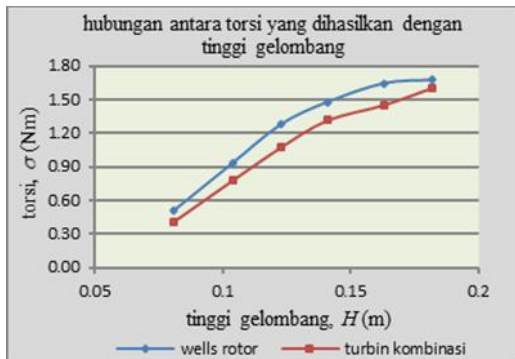
Data putaran turbin dan torsi yang diperoleh dari hasil pengujian turbin kombinasi *wells* dan *darrieus* (konfigurasi 1) dengan perbedaan tinggi gelombang adalah sebagai berikut, seperti gambar 6 dan gambar 7, pada tinggi gelombang  $H = 0,081$  m menghasilkan putaran 3,6 rpm dan torsi 0,4 Nm, pada tinggi gelombang  $H = 0,104$  m menghasilkan putaran 5,6 rpm dan torsi 0,77 Nm, pada tinggi gelombang  $H = 0,123$  m menghasilkan putaran 8,6 rpm dan torsi 1,07 Nm, pada tinggi gelombang  $H = 0,141$  m menghasilkan putaran 10 rpm dan torsi 1,32 Nm, pada tinggi gelombang  $H = 0,163$  m menghasilkan putaran 11,2 rpm dan torsi 1,45 Nm, dan pada tinggi gelombang  $H = 0,182$  m untuk turbin menghasilkan putaran 12 rpm dan torsi 1,61 Nm.



Gambar 6. Grafik hubungan putaran dan tinggi gelombang pada  $T=1,5$  s

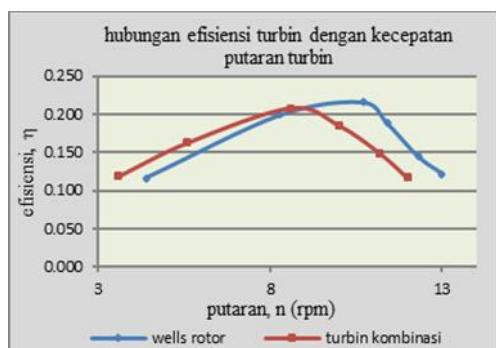
Sedangkan data putaran turbin dan torsi yang diperoleh dari hasil pengujian *wells rotor* (konfigurasi 2) dengan perbedaan tinggi gelombang ditunjukkan pada gambar 6 dan gambar 7, pada tinggi gelombang  $H = 0,081$  m menghasilkan putaran 4,4 rpm dan torsi 0,5 Nm, pada tinggi gelombang  $H = 0,104$  m menghasilkan putaran 8,3 rpm dan torsi 0,93 Nm, pada tinggi gelombang  $H = 0,123$  m menghasilkan putaran 10,7 rpm dan torsi 1,28 Nm, pada tinggi gelombang  $H =$

0,141 m menghasilkan putaran 11,4 rpm dan torsi 1,48 Nm, pada tinggi gelombang  $H = 0,163$  m menghasilkan putaran 12,3 rpm dan torsi 1,64 Nm, dan pada tinggi gelombang  $H = 0,182$  m untuk turbin menghasilkan putaran 13 rpm dan torsi 1,76 Nm.



Gambar 7. Grafik hubungan torsi dan tinggi gelombang pada  $T=1,5s$

Sedangkan fenomena yang terjadi turbin *darrieus* tidak berputar sedikitpun walaupun dikenai gelombang dengan tingkat ketinggian yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan karena posisi dari bilah turbin *darrieus* vertikal sehingga kecepatan partikel air dan tekanan yang mengenai bidang bilah turbin *darrieus* adalah sama.



Gambar 8. Grafik hubungan efisiensi dan putaran

Dari data kecepatan putaran turbin diperoleh saat pengujian dan kecepatan partikel air akibat gerak *orbital* dari gelombang, yang dipengaruhi oleh dimensi dari luasan turbin kemudian dilakukan perhitungan menggunakan beberapa persamaan untuk menentukan besarnya efisiensi turbin seperti ditunjukkan pada tabel 1 dan tabel 2.

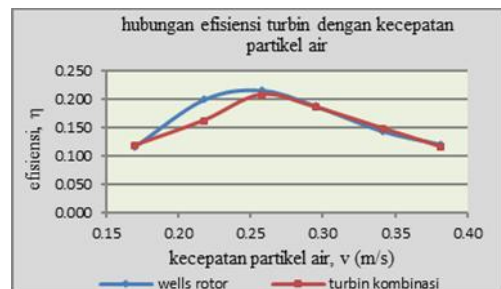
Tabel 1. Efisiensi pada wells rotor

Tinggi gelombang, $H$ (m)	Kec. partikel, $v$ (m/s)	Potensi daya, $P_n$ (watt)	Daya turbin, $P_t$ (watt)	Efisiensi $\eta$
0,081	0,17	1,58	0,18	0,116
0,104	0,22	3,35	0,67	0,199
0,123	0,26	5,55	1,20	0,216
0,141	0,30	8,36	1,58	0,188
0,163	0,34	12,91	1,87	0,145
0,182	0,38	17,97	2,19	0,122

Tabel 2. Efisiensi pada turbin kombinasi

Tinggi gelombang, $H$ (m)	Kec. partikel, $v$ (m/s)	Potensi daya, $P_n$ (watt)	Daya turbin, $P_t$ (watt)	Efisiensi $\eta$
0,081	0,17	1,58	0,19	0,119
0,104	0,22	3,35	0,55	0,163
0,123	0,26	5,55	1,15	0,208
0,141	0,30	8,36	1,55	0,185
0,163	0,34	12,91	1,92	0,149
0,182	0,38	17,97	2,10	0,117

Hubungan efisiensi dengan putaran *rotor* seperti gambar 8 dimana efisiensi maksimal *wells rotor* terus meningkat sampai pada puncaknya sebesar 0,216 pada kecepatan putaran *rotor* 10,7 rpm, kemudian mengalami penurunan. Sedangkan efisiensi pada turbin kombinasi antara *wells* dan *darrieus* juga meningkat dari awalnya sampai pada puncaknya sebesar 0,208 pada kecepatan putaran *rotor* 10 rpm dan kemudian juga mengalami penurunan.

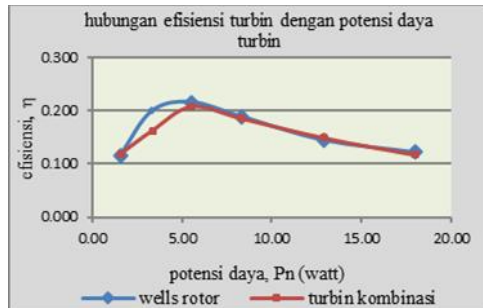


Gambar 9. Grafik efisiensi dan kecepatan partikel air

Hubungan efisiensi dengan kecepatan partikel air (gambar 9), dimana efisiensi maksimal *wells rotor* terus meningkat sampai pada puncaknya sebesar 0,216 pada kecepatan partikel air 0,26 m/s dan tinggi gelombang 0,123 m, kemudian mengalami penurunan. Sedangkan efisiensi pada turbin kombinasi antara *wells* dan *darrieus* juga meningkat dari awalnya sampai pada puncaknya sebesar 0,208 pada kecepatan partikel air 0,26 m/s dan pada tinggi gelombang 0,123 m dan kemudian juga mengalami penurunan.



Tingkat konversi akan menjadi sangat tinggi jika koefisien aliran menurun sekitar 0,1 sesuai dengan literasi sebelumnya (Watterson dan Raghunathan, 2006).



Gambar 10. Grafik hubungan efisiensi dan daya

Pada potensi daya turbin (gambar 10) yang dihasilkan efisiensi tertinggi pada daya sebesar 5,55 w baik untuk efisiensi *wells rotor* dan turbin kombinasi *wells* dan *darrieus*.

*Tip speed ratio* (TSR) adalah perbandingan antara kecepatan rotor dan kecepatan aliran.

$$TSR (\lambda) = \frac{\omega R}{v} \quad (6)$$

dimana,  $\lambda$  = tip speed ratio  
 $\omega$  = kecepatan sudut (rad/s)  
 $R$  = jari-jari turbin (m)  
 $v$  = kecepatan (m/s)

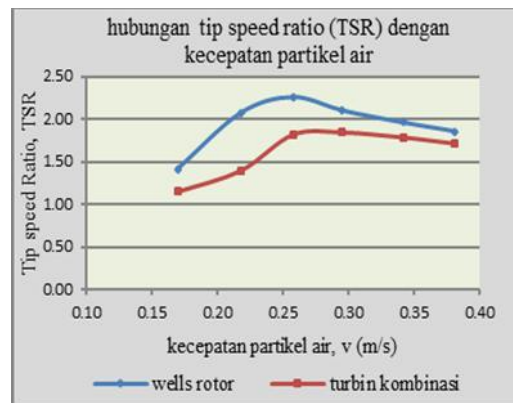
Tabel 3. TSR pada *wells rotor*

Tinggi gel. H (m)	Putaran, n (rpm)	Kecepatan, v (m/s)	Jari-jari, r (m)	TSR
0,081	4,4	0,17	0,52	1,41
0,104	8,3	0,22	0,52	2,08
0,123	10,7	0,26	0,52	2,26
0,141	11,4	0,30	0,52	2,10
0,163	12,3	0,34	0,52	1,96
0,182	13	0,38	0,52	1,86

Tabel 4. TSR pada turbin kombinasi

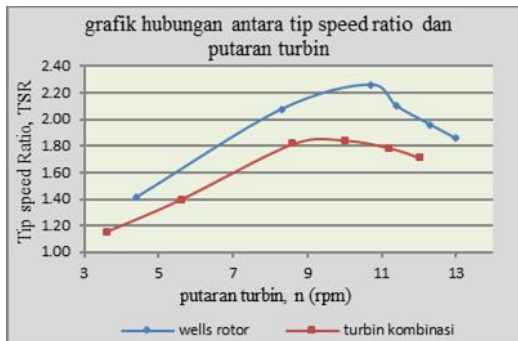
Tinggi gel. H (m)	Putaran, n (rpm)	Kecepatan, v (m/s)	Jari-jari, r (m)	TSR
0,081	3,6	0,17	0,52	1,16
0,104	5,6	0,22	0,52	1,40
0,123	8,6	0,26	0,52	1,82
0,141	10	0,30	0,52	1,84
0,163	11,2	0,34	0,52	1,79
0,182	12	0,38	0,52	1,71

Hubungan TSR dengan putaran turbin dari hasil pengujian diketahui bahwa nilai TSR dari *wells rotor* lebih tinggi daripada turbin kombinasi. Nilai TSR masing-masing konfigurasi meningkat sampai pada putaran 10,7 rpm pada *wells rotor* dan 10 rpm pada turbin kombinasi kemudian menurun dengan bertambahnya putaran turbin pada gambar 11, dengan peningkatan kecepatan air pada tinggi gelombang yang berbeda belum tentu menghasilkan TSR yang meningkat pula, hal ini karena TSR berhubungan dengan putaran turbin dimana putaran turbin yang terjadi pada titik tertentu akan mengalami kenaikan yang *significant* jika tinggi gelombang ditambahkan terus kemungkinan akan *drop* atau *stall*.



Gambar 11. Grafik hubungan TSR dan kecepatan partikel air

Pada gambar 12. hubungan antara TSR dan efisiensi dimana pada *wells rotor* pada awalnya akan terus meningkat dengan sampai pada puncak efisiensi yaitu 0,216 dan TSR tertinggi 2,26 kemudian keduanya mengalami penurunan. Sedangkan pada turbin kombinasi *wells* dan *darrieus* mempunyai *trendline* yang sama dimana pada efisiensi puncaknya 0,28 dan TSR tertinggi 1,84 dan kemudian juga mengalami penurunan efisiensi disertai dengan penurunan TSR. Hal ini disebabkan oleh karena putaran dan torsi yang dihasilkan oleh turbin pada tinggi gelombang 0,14 m sampai dengan 0,18 m tidak mengalami peningkatan yang *significant* (peningkatan tidak linier) demikian juga pada kecepatan partikel air mengalami peningkatan secara linier seiring dengan peningkatan tinggi gelombang.



Gambar 12. Grafik hubungan TSR dan putaran

## KESIMPULAN

*Wells rotor* yang terpasang horisontal hanya mampu menerima energi gelombang akibat adanya gerakan *orbital* dari partikel-partikel air dan tidak efektif dalam menerima energi arus air karena sejajar dengan arah aliran partikel air. Bilah turbin *darrieus* akan menjadi *resistance* disaat terkena gelombang. Sehingga penggunaan turbin kombinasi *wells* dan *darrieus* sangat efektif dalam menyerap kedua energi baik gelombang maupun energi arus.

Turbin kombinasi mempunyai *self starting* yang rendah dimana pada tinggi gelombang 0,08 m sudah menghasilkan putaran turbin. Efisiensi maksimal yang diperoleh dari turbin kombinasi adalah sebesar 21,6% dan pada *wells rotor* sebesar 20,8% dengan ketinggian gelombang 0,123 m, sedangkan *tip speed ratio* (TSR) pada turbin kombinasi sebesar 1,84 dan pada *wells rotor* sebesar 2,26.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan pengujian turbin kombinasi *wells* dan *darrieus*, antara lain Ka. UPT BTH-BPPT, Pembimbing I dan pembimbing II, Dosen Pascasarjana PPsTK-ITS dan rekan-rekan yang ada di bengkel model dan pengujian model BTH.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bambang Triatmodjo. (1999), *Teknik Pantai*, edisi pertama, BETA, Yogyakarta.
- Bernard Le Mehaute. (1976), *An Introduction hydrodynamics & water waves*, Springer-Verlag, New York.
- David G. Dorrell and Min-Fu Hsieh. (2008), *Performance of Wells Turbines for use in*

- Small-Scale Oscillating Water Columns*, ISOPE.
- Gato, L. M. C. and Henriques, J. C. C.(1994), "Optimization of Symmetrical Blades for Wells Turbine", *Air Turbine Development and Assessment for Wave Power Plants*, contract JOU2-CT93-0333, Progress Report, Instituto Superior Técnico, Lisbon.
- Herald Vervoorn. (1997), *Wave Energy Conversion*, Thesis, Delf University.
- John Twidell and Tony Weir. (2006), *Renewable Energy Resources*, 2nd edition, Taylor & Francis, London.
- Kantha and Clayson. (2000), *Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes*, university of Colorado.
- Katsuya Takasaki, Manabu Takao, Toshiaki Setoguchi. (2014), *Effect Of Blade Shape on the Performance of Wells Turbine for Wave Energy Conversion*, International Scholarly and Scientific Research & Innovation.
- R, Bhattacharyya, M.E. Mc Cormick. (2003), *Wave Energy Conversion*, volume 6, series edition, Elsevier Ocean Engineering, New York.
- S. Raghunathan. (1995), *The Wells Air Turbine For Wave Energy Conversion*, AerospaceSci. Vol.31
- Thakker, A., Abdulhadi, R., (2008), *The performance of Wells turbine under bi-directional airflow*, Renewable Energy, 33, 11, 2467-2474.
- Thakker, A., Frawley, P. i Sheik Bajee, E. (2001), *Numerical Analysis of Wells Turbine Performance Using a 3D Navier-Stokes Explicit Solver*. Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway, 604-608.
- Z. Carija, L. kranjcevic, V. Banic, M. Cavrak, (2012), *Numerical Analysis of Wells Turbine for Wave Power Conversion*, Article Faculty of Engineering, University of Rijeka.
- International Application Published Under Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 2010/011133 A1, 2010, *A Device for the Utilisation of Wave Energy and a Method*.
- International Application Published Under Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 2010/062170 A1, 2010, *An Apparatus for Harvesting Energy from a Body of Water and a Method*.